

RELACIONES ENTRE LA OCEANOGRAFÍA Y LOS RECURSOS MARINOS RENOVABLES

(ecología/oceanografía/recursos renovables/pesquerías/cambio global)

ÁNGEL GUERRA SIERRA *

* ECOBIOMAR: Instituto de Investigaciones Marinas. CSIC. Eduardo Cabello 6, 36208 Vigo.

RESUMEN

En este trabajo se pone de manifiesto, a través de varios ejemplos, la conexión existente entre factores biológicos y atmosférico-oceánicos, tanto a pequeña escala (afloramiento de Galicia) como a escala global (episodios de El Niño/ENSO e inestabilidades de la Corriente Circumpolar Antártica) en poblaciones de cefalópodos. Asimismo, a partir de estudios realizados en mejillón cultivado en Galicia, se muestra la influencia de factores ambientales sobre la fisiología de los organismos. Esos ejemplos, entre otros existentes, señalan la conveniencia de potenciar estudios interdisciplinares, que permitan desarrollar una comprensión integrada de las interacciones entre factores físicos, ciclos biogeoquímicos y redes tróficas marinas. Este enfoque proporcionará una comprensión de la variabilidad que afecta a los recursos vivos marinos más realista de la existente hasta ahora. Las estrategias de gestión pesquera deben ser lo suficientemente flexibles para incluir las respuestas retardadas que se producen en las poblaciones como consecuencia de variaciones ambientales. También se indican varios de los requisitos necesarios para el desarrollo armonioso y profundo de este tipo de estudios integrados, entre los que destaca la necesidad de programas coordinados de investigación con sistemas estables para obtener series históricas largas y fiables de datos sobre parámetros atmosféricos y oceánicos, así como sobre variaciones de la biomasa de las poblaciones marinas naturales no explotadas y de capturas y capturas por unidad de esfuerzo en los recursos explotados. Por último, se discute si las fluctuaciones irregulares que

se observan en las poblaciones marinas pudiesen ser consideradas series matemáticas caóticas.

ABSTRACT

From the review of some examples, mainly dealing with cephalopod populations, the relationships between biological and atmospheric-oceanographic factors is shown. Environmental effects on marine populations dynamic is evidenced both to small (Galician upwelling events) and global scale (El Niño/ENSO and Antarctic Circumpolar Current instabilities). The influence of environmental factors on the physiology of some marine organisms is stated from the review of studies carried out on the Galician cultured mussel. The reviewed examples clearly indicated the need for undertaking interdisciplinary works, which allow to develop an integrate understanding of the interactions between physical parameters, biogeochemical cycles and marine food webs. This approach would provide a more realistic view of the large-scale, naturally occurring variations of marine resources. Fishery management strategies must be flexible enough to include delayed responses to environmental variations. Development of this integral knowledge requires inputs from a variety of disciplines, coordinate research programmes with permanent systems to obtain long series of accurate data on atmospheric and oceanographic parameters, as well as the biomass variability of the non exploited marine populations, and catches and catch per unit effort of exploited marine resources. Whether or not the irregular

observed fluctuations of marine populations are mathematical chaotic series is discussed.

INTRODUCCIÓN

La primera vez que escuché hablar de interdisciplinariedad en el planteamiento y posibles soluciones a problemas de Biología Marina fue hacia octubre de 1968. Ocurrió en las primeras clases que recibí del Dr. Ramón Margalef, entonces reciente catedrático de Ecología en la Universidad de Barcelona y ya un investigador de prestigio internacional. Han transcurrido treinta y cinco años desde entonces y los enfoques interdisciplinarios se han afincado con tal fuerza en nuestros modos de abordar todo tipo de problemas, que nuestra forma de pensar, nuestras actividades de investigación y bastantes aspectos de nuestros sistemas educativos involucran varios campos o disciplinas. Esto, que significa sin lugar a dudas un enriquecimiento intelectual, ha llegado a ser considerado tan esencial por algunos amigos de los extremismos, que un proyecto o un currículo que no sean interdisciplinarios se consideran anticuados y prácticamente inútiles.

Actualmente, existe una amplia evidencia sobre los impactos ecológicos de los cambios climáticos recientes, que se extiende desde los ambientes terrestres polares hasta los marinos tropicales. Las respuestas de la flora y la fauna a estos cambios comprenden una serie de variaciones en los ecosistemas y en sus jerarquías organizativas, que van desde el nivel de especie hasta el de comunidades. Aunque todavía existe bastante incertidumbre sobre como afecta el cambio global en la trayectoria de las comunidades y los ecosistemas, y nos encontramos en los inicios de la comprensión de este tipo de interrelaciones, ya existen evidencias bastante claras de algunas respuestas ecológicas frente a las tendencias de los recientes cambios climáticos. En los mares y océanos los efectos climáticos sobre la dinámica de los ecosistemas marinos más extendidos afectan al reclutamiento de las especies y a las redes tróficas (Walther, Post, Convey, Menzel, Parmesan, Beebee, Formentin, Hoegh-Gudberg y Bairlein, 2002).

La dinámica de los ecosistemas marinos, que es donde se deben encuadrar las reflexiones de este

artículo, es compleja. En unas determinadas coordenadas espacio-temporales cohabitan e interrelacionan comunidades, poblaciones e individuos, cuyas funciones vitales están profundamente influidas por factores químicos y físicos. Por tanto, la aproximación más realista y con mayor esperanza de éxito para proporcionar una comprensión profunda de los procesos que ocurren y rigen estos sistemas es respetar su complejidad, lo cual sólo puede hacerse abordándolos desde la interdisciplinariedad. No siempre ha sido así, ni desafortunadamente lo es todavía. Los planteamientos reduccionistas, por más fáciles y manejables, son aún muy frecuentes. Sin embargo, la tendencia es clara y conduce hacia la integración disciplinar, lo que no está en contradicción con que la especialización sea necesaria. Quizá en la Física y en la Química queden ya relativamente pocos sistemas complejos por estudiar, pero la Biología tiene todavía una enormidad de ellos, y para su explicación hay que acudir a los niveles que estudian aquellas ciencias, tal y como acertadamente ha señalado Gell-Mann (1995): "De todo esto se desprende una lección útil, y es que, las diferentes ciencias residen efectivamente en diferentes niveles, forman parte de una estructura conexas. La unicidad de esta estructura está basada en las relaciones entre las partes. Una ciencia perteneciente a un nivel determinado abarca las leyes de otra ciencia menos fundamental, situada a un nivel superior. Pero esta última, al ser especial, precisa de información adicional además de las leyes del nivel inferior. En cada nivel hay leyes por descubrir, importantes por sí mismas".

La investigación de los recursos marinos renovables se refiere al estudio de los organismos marinos naturales potencial o actualmente comerciales, así como de aquellos factores que influyen en el entramado de sus ciclos vitales. Desde hace años se viene señalando el mal estado de muchos recursos marinos, principalmente de peces tradicionalmente explotados (Myers y Worm, 2003), debatiéndose sobre sus causas y consecuencias, en especial sobre la preocupante tendencia global hacia la explotación de peces pelágicos planctófagos de pequeño tamaño (Fig.1); es decir, sobre el progresivo deslizamiento de la pesca hacia especies pertenecientes a niveles tróficos cada vez más bajos (Pauly, Christensen, Dalsgaard, Froese y Torres, 1998a; Caddy, Csirke, García y Grainger, 1998; Pauly, Froese y Christensen,

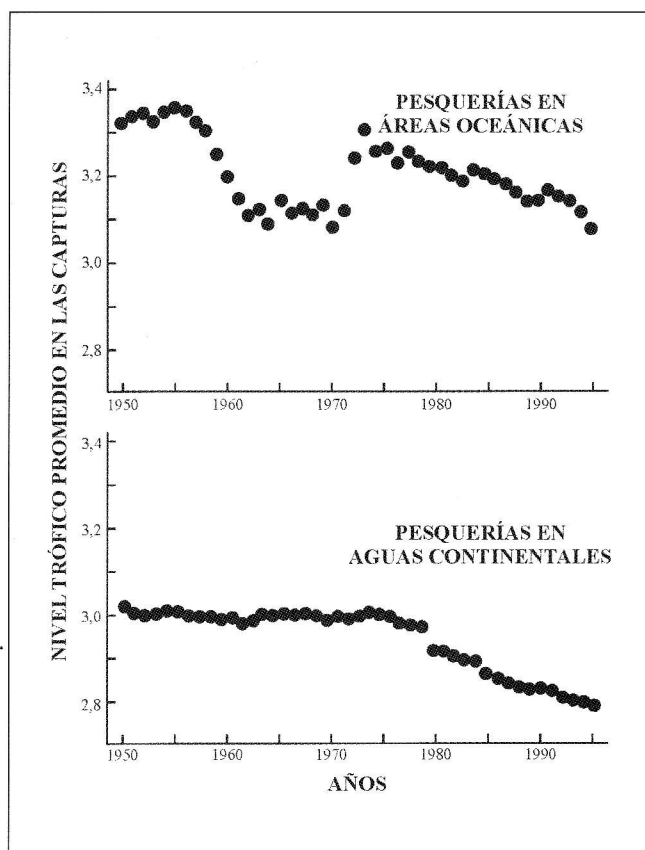


Figura 1. Progresivo descenso del nivel trófico de las capturas en pesquerías de áreas oceánicas y aguas continentales (Pauly et al., 1998).

1998b). La creciente preocupación por la sobreexplotación de los recursos marinos renovables se materializó en el establecimiento de dos acuerdos de las Naciones Unidas: el Tratado sobre Poblaciones Transzonales y Altamente Migratorias (1995) y el Código de Conducta para la Pesca Responsable (1995). Como ha señalado F. Saborido (IIM-CSIC, Vigo, com. per.): “Estos acuerdos, ratificados por todas las potencias mundiales, entre ellas la Unión Europea, han supuesto un punto de inflexión en la concepción tradicional sobre la regulación de los recursos pesqueros y van a condicionar de forma decisiva la orientación futura de la investigación relacionada”. Ellos constituyen la base sobre la que se estableció el “Enfoque de Precaución para la Regulación Pesquera”, que concede gran importancia, entre otros, a la influencia de los factores ambientales sobre los recursos explotados, que en el mar son de naturaleza atmosférico-oceánica. Se ha tomado mayor conciencia, por tanto, de la importancia de una aproximación pluridisciplinar para conseguir un conocimiento cada vez más

realista de la dinámica de las poblaciones marinas explotadas, aunque esta aproximación no es nueva, como tampoco lo es la consideración de que son muchas las especies y, en realidad, las poblaciones que interactúan entre sí dentro de los ecosistemas (Margalef, 1974). Desgraciadamente, ambos aspectos han sido bastante descuidados.

La ecología trófica de los océanos se ha basado en el principio de que un depredador debe mantener un balance positivo a corto plazo entre la energía que obtiene de sus presas y la que gasta en localizarlas y capturarlas. Así, cuando la densidad de una población de presas decrece hay un punto a partir del cual el depredador, debe dirigir su atención hacia presas alternativas, migrando hacia áreas más ricas en alimento, o bien debe adoptar un estado inactivo que le permita la máxima conservación de energía. Las pesquerías industriales modernas, y también, aunque en menor medida, muchas pesquerías artesanales, evitan esta limitación gastando energía fósil. Por ello, han sido capaces de cortocircuitar y alterar los mecanismos que actúan preservando los diversos ecosistemas oceánicos a largo plazo, llevando a bastantes poblaciones de organismos marinos hasta muy bajos niveles de abundancia. Otro de los factores de origen antropogénico que explican parte del agotamiento que muestran muchos recursos vivos marinos es la contaminación, que no sólo afecta a las especies y a sus hábitats, sino también a los intercambios entre la atmósfera y los mares y océanos de la Tierra. Sin embargo, muchas de las variaciones de biomasa que han experimentado varias pesquerías, en algunos casos casi catastróficas, se deben más a la influencia de factores atmosférico-oceánicos que a la propia explotación humana. Esto no significa una excusa para que se continúen realizando prácticas pesqueras irresponsables, ni la esquilmación de los recursos marinos renovables, sino una advertencia para que las variaciones naturales de abundancia de las poblaciones de organismos marinos acontecidas en períodos amplios sean consideradas en la gestión pesquera.

A continuación se exponen varios ejemplos de estudios interdisciplinarios, donde se relacionan determinados fenómenos oceanográficos con los recursos vivos marinos. A través de estos ejemplos se descubrirán también algunos de los requisitos necesarios para realizar este tipo de investigaciones.

RELACIONES ENTRE VARIABILIDAD OCEANOGRÁFICA A GRAN ESCALA Y POBLACIONES

La pota festoneada (*Martialia hyadesi*) es un cefalópodo omastréfido oceánico que tiene una distribución circumantártica, extendiéndose desde mar abierto, asociada con el Frente Polar Subantártico, hasta la plataforma Patagónica. Se trata de una especie de la que se obtienen capturas de poca y variable cuantía en la pesquería dirigida a la pota argentina (*Illex argentinus*) ubicada en el Atlántico sudoeste (Fig. 2). Sin embargo, ocasionalmente, se han pescado —y se continúan pescando— enormes cantidades. Con objeto de comprender este fenómeno y la influencia del ambiente sobre la dinámica de las poblaciones de esta pota oceánica, que podría constituir un recurso potencialmente interesante desde un punto de vista comercial, González, Trathan, Yau y Rodhouse (1997) examinaron muestras de animales capturados en 1995 —año en que aconteció uno de esos inusuales incre-

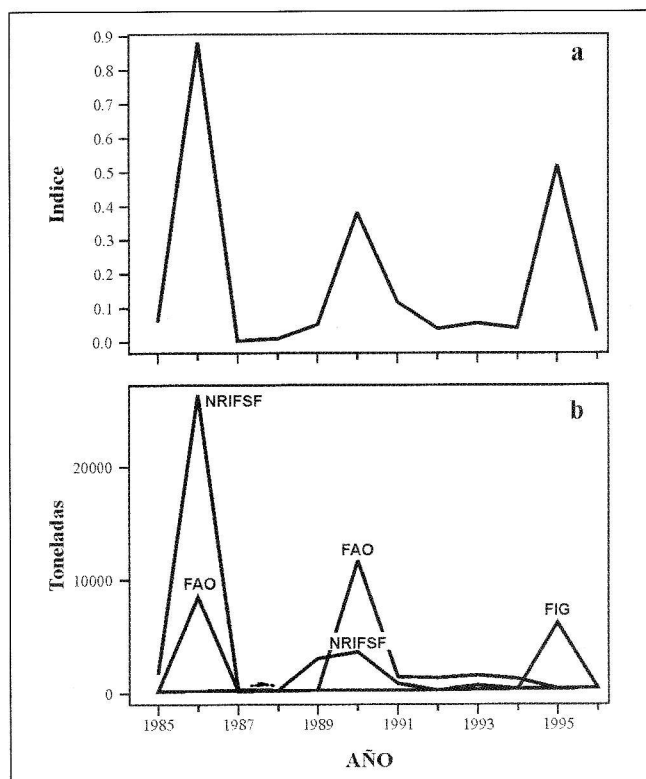


Figura 2. *Martialia hyadesi*. (a) Índice medio de capturas. (b) Captura anual entre 1985 y 1996 según los registros del Falkland Islands Government, Fisheries Department, Stanley (FIG); Shimizu, Japón (NRIFS) y la Fisheries and Agriculture Organisation (FAO), Roma (González et al., 1997).

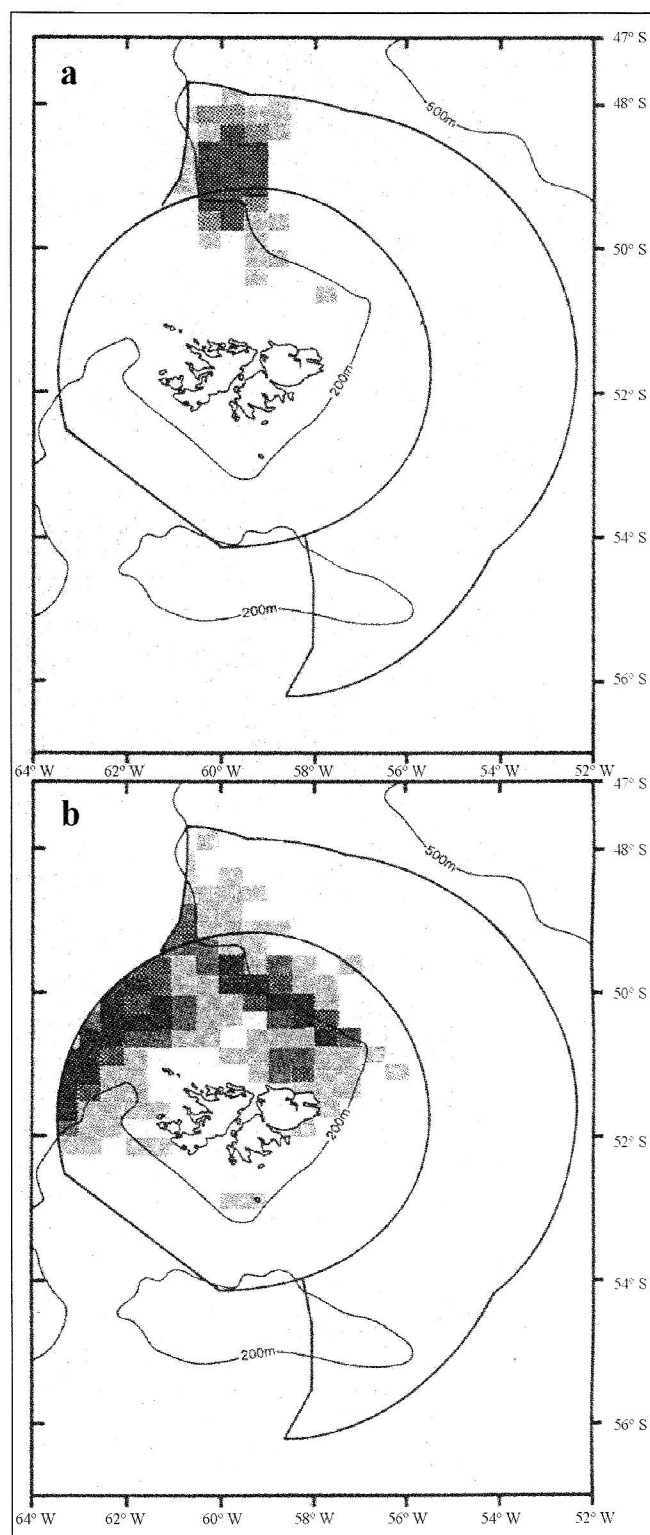


Figura 3. Distribución de las capturas de (a) *Martialia hyadesi* entre el 4 y el 19 de mayo de 1995, (b) de *Illex argentinus* entre el 1 de febrero y el 19 de marzo de 1995 en Falklands Interim Conservation and Management Zone (FICZ) y la Falklands Outer Conservation Zone (FOCZ) están señaladas por líneas; la diferente densidad del sombreado indica distinta abundancia de las capturas (González et al., 1997).

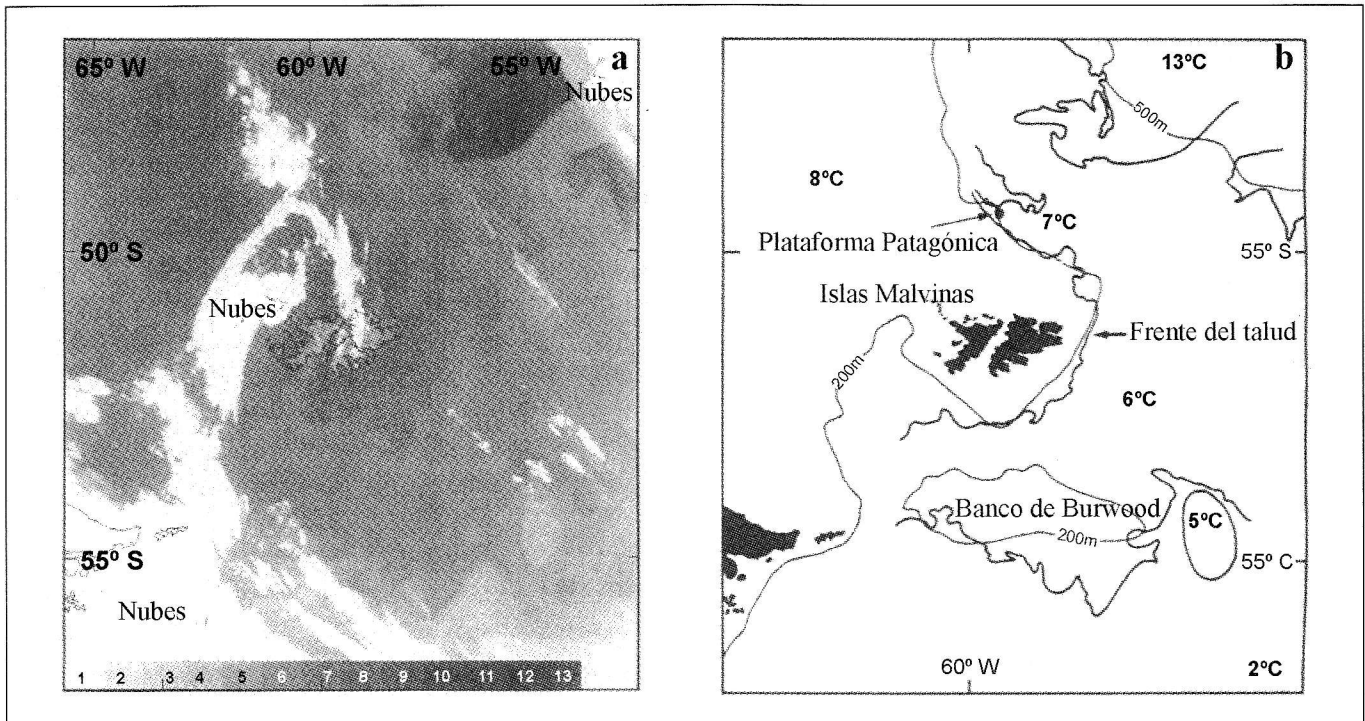


Figura 4. (a) Imagen de infrarrojos desde satélite de la temperatura superficial del agua alrededor de la plataforma Patagónica y de la región oceánica que rodea las islas Malvinas. Tomada a las 9.30 horas de la base de datos del ARIES (Antarctic Reception for Environmental Studies); (b) Áreas de tierra (en oscuro), isóbatas e isotermas ilustrando la oceanografía de superficie incluyendo formaciones de mesoescala (*eddies*) en el borde de la plataforma Patagónica al norte de las Malvinas. La flecha indica donde se recogió la serie histórica de datos de temperatura superficial del agua (SST OI). (González et al., 1997).

mentos de las capturas—, y analizaron diez años de datos históricos de capturas y datos oceanográficos, obtenidos mediante sensores remotos, de esa pesquería y del área donde acontece. Los datos de 1995 mostraron que *M. hyadesi* está íntimamente ligada a las aguas frías del Frente Polar Subantártico (FPSA) de la corriente de las islas Malvinas, que en ese año había penetrado hacia el norte de las islas con una pujanza inusual, donde depreda sobre peces y crustáceos oceánicos, y que su área de distribución raramente se extiende hasta la plataforma Patagónica (Fig. 3). Las potas capturadas en 1995 tenían entre 6 y 12 meses de edad, estando todas las hembras inmaduras, mientras que la mayoría de machos estaban completamente maduros. Las imágenes de temperatura superficial del agua (TSA) demostraron la existencia de grandes remolinos (*eddies*) en el frente de ruptura de la plataforma continental, entre el agua de la plataforma Patagónica y la del FPSA (Fig. 4), durante y donde se produjeron las grandes capturas de esa especie dicho año. Se observó, además, que la aparición de *M. hyadesi* en la pesquería dirigida a la pota argentina durante la última década, incluyendo 1995, estaba sig-

nificativamente relacionada con anomalías de la TSA. Así, los aumentos de captura observados en 1986, 1990 y 1995 se correspondieron con anomalías positivas y negativas en la temperatura superficial del agua. Un paso más de este estudio mostró que, muy probablemente, existe una conexión entre esas anomalías, los episodios El Niño/ La Niña/ Oscilación Sureña (ENSO) e inestabilidades de escala subdecadal en la Corriente Circumpolar Antártica (Fig. 5). Lo observado durante el período estudiado fue la presencia de episodios de El Niño durante 1983, 1987 y 1992 en el Pacífico sureste, seguidos por episodios de La Niña, que representaron un descenso de la temperatura del agua en 1985, 1988 y 1994/95. Desde que se observan las anomalías positivas en el Pacífico sureste producidas por efecto de El Niño hasta que se produce el aumento de temperatura en el Atlántico sudoeste transcurre un período comprendido entre 24 y 30 meses. El retardo de la aparición de anomalías negativas en el Pacífico sureste (La Niña) y el Atlántico sudoeste varió entre 18 y 24 meses. Por lo tanto, considerando que estos episodios del Pacífico se manifiestan en el Atlántico con un retardo de unos dos años,

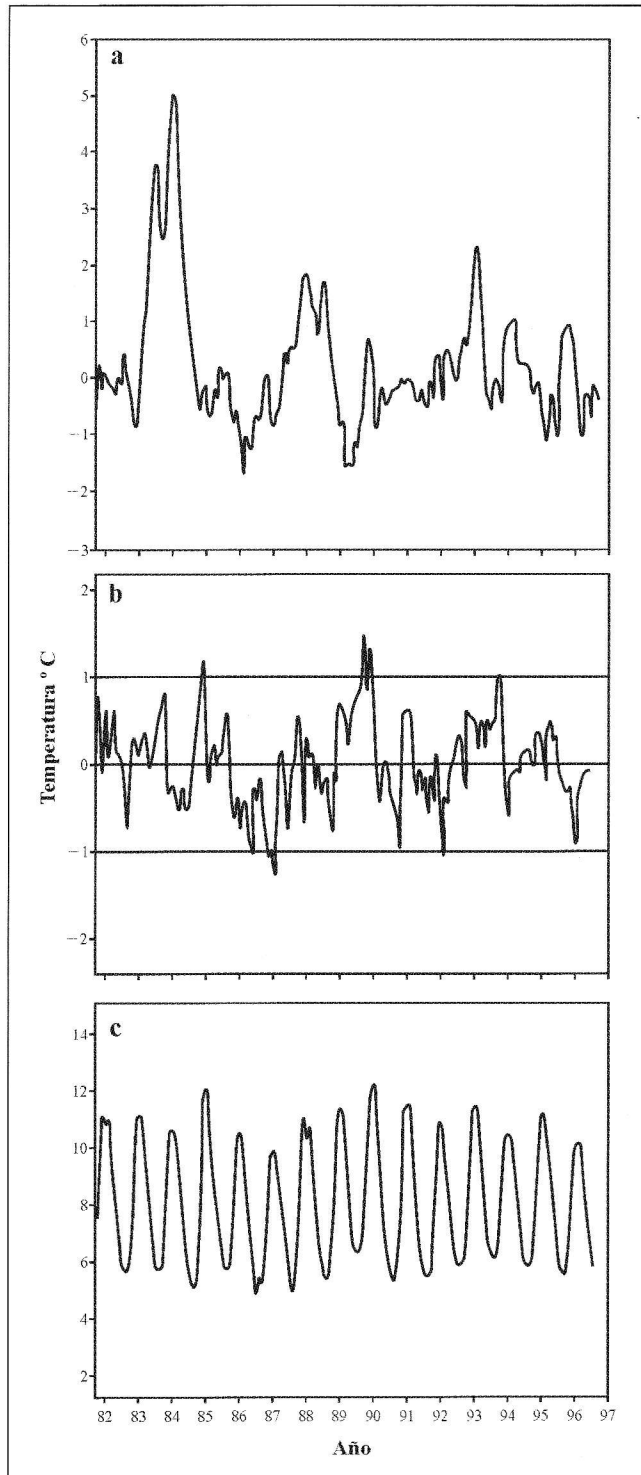


Figura 5. (a) Datos de la anomalía de la temperatura superficial del agua (Centro de Datos de NCAR de Boulder, Colorado) en el Pacífico oriental en la zona comprendida entre 0° y 10° S, 80° y 90° W; (b) Anomalías mensuales (las líneas superior e inferior indican el rango ± 2 de la desviación típica) y (c) interpolación mensual de las series de datos de la temperatura superficial del agua (SST OI) entre Noviembre de 1981 y Julio de 1996 para la parrilla de celdas $59^{\circ} 30' W$, $49^{\circ} 30' S$. (González et al., 1997).

sería posible predecir la aparición de grandes abundancias de *M. hyadesi* al norte de la corriente de Malvinas. Las potas son cefalópodos oceánicos de vida muy breve, siendo bastante plausible que sean capaces de responder rápidamente ante cambios ambientales. Sin embargo, todavía no está claro en qué etapa del ciclo vital de *M. hyadesi* ejercen su efecto tales cambios. Los autores proponen dos hipótesis alternativas, aunque no excluyentes. Eventos calurosos anteriores a la aparición de esta especie podrían favorecer el éxito reproductor de la generación parental dando lugar a fuertes reclutamientos, o, alternatively, esta especie, propia de aguas frías, podría extender su rango de distribución hasta el borde de la plataforma Patagónica en etapas tempranas del desarrollo de los eventos oceanográficos fríos (La Niña). En cualquier caso, los efectos oceanográficos ocurren muy probablemente a través de la red trófica, vía las presas más frecuentes en la dieta de *M. hyadesi*.

Actualmente, los grandes colapsos sufridos por la pesquería de anchoveta del Perú a lo largo de los años se entienden mejor como consecuencia de haberse profundizado en la comprensión de las oscilaciones oceanográficas de El Niño, que provocan alteraciones climáticas a escala mundial, afectando también a la producción de maíz en algunos países africanos, al aumento de casos de malaria en Colombia, y teniendo otras repercusiones sobre la producción de materias primas y la salud humana. De hecho, existen diferentes tipos de modelos que permiten predecir con algunos meses de antelación la aparición de este tipo de eventos. En un escenario todavía más amplio, Chavez, Ryan, Luch-Cota y Ñiquen (2003) han demostrado que en el océano Pacífico, la temperatura de la atmósfera y del océano, el dióxido de carbono atmosférico, las descargas de anchoa y sardina en Japón, California, Perú y Chile, así como la productividad costera y de los ecosistemas de mar abierto han variado en periodos de 50 años. A mediados de los años setenta, el Pacífico cambió desde un régimen frío favorable a la anchoa hasta un régimen caliente favorable a la sardina. A mediados de los noventa, el cambio fue al contrario. Esas variaciones naturales de gran escala deben tenerse en cuenta cuando se consideran los cambios climáticos inducidos por la actividad humana, así como en la gestión de los recursos vivos marinos.

Otro caso comparable, son las oscilaciones cíclicas que experimentan las masas de agua del Atlántico

Norte (evento NAO u Oscilación del Atlántico Norte). Aquí el proceso de comprensión fue al contrario que en el caso de El Niño; partiendo de estudios estrictamente oceanográficos se pudo sugerir que las variaciones de abundancia observada en varias especies del zooplankton (principalmente copépodos del género *Calanus*) podrían afectar —vía red trófica— a las pesquerías de gambas, bacalao y peces planos del Atlántico Norte (Fromentin y Planque, 1996). Sin embargo, el mecanismo de cómo se establece esta relación es mucho menos conocido que en el caso de El Niño.

Los resultados de estas investigaciones muestran la importante conexión existente entre factores puramente biológicos —como la dieta de una especie, la edad de los individuos, o su estado de madurez sexual— y factores atmosférico-oceánicos. Asimismo, señalan que el conocimiento entre las poblaciones de cefalópodos omastreídeos, su dieta, los rasgos oceanográficos de mesoescala, las relaciones entre su dinámica y la variabilidad oceanográfica de gran escala (ya sea manifestándose como ENSO o como Ondas Circumpolares Antárticas) son de gran utilidad para comprender la variabilidad en las poblaciones de organismos de ciclos de vida cortos, que responden rápidamente a cambios ambientales.

Para llevar a cabo este tipo de estudios es necesario señalar, en primer lugar, la importancia de contar con series históricas fiables de capturas y capturas por unidad de esfuerzo para todas y cada una de las especies de una pesquería. Y en segundo término, la necesidad de contar con series temporales largas de datos atmosféricos y oceanográficos. El mantenimiento de una recogida científica de ese tipo de datos en áreas extensas durante tanto tiempo rebasa la capacidad y vida de un investigador, de manera que esto sólo puede abordarse desde instituciones idóneas, que conciben y mantengan programas científicos al abrigo de los frecuentes cambios organizativos que sufre la administración (Guerra y Sánchez Lizaso, 1998). En ese sentido, el dispositivo *ARGO*, parte del programa internacional *Global Ocean Observing System (GOOS)*, ha permitido lanzar hasta ahora 770 boyas, de las 3000 proyectadas, para cubrir razonablemente todos los océanos del mundo. Estas boyas descienden hasta 2000 metros de profundidad y se desplazan, lo que permite obtener registros de temperatura y salinidad en toda la columna de agua, así como

datos sobre corrientes. La información que proporciona este tipo de boyas es más completa y precisa de la que suministran los sensores colocados en satélites. Actualmente hay un consenso general sobre la gran utilidad de la teledetección en los estudios hidrográficos y pesqueros, existiendo grandes programas basados en este tipo de planteamiento, como por ejemplo el *Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC)*. Sin embargo, el conocimiento que proporcionan los sensores sobre satélites se refiere a unos pocos parámetros físico-químicos y a la clorofila en una capa muy superficial del océano, insuficiente para comprender con profundidad los complejos procesos oceanográficos y los ciclos biogeoquímicos marinos. Quizá en demasiadas ocasiones, y con excesiva alegría, se esté intentando comprender la interconexión entre los procesos atmosférico-oceánicos y los recursos biológicos marinos, e incluso modelar este tipo de relaciones, únicamente a partir de datos conseguidos por teledetección, sin considerar que esos planteamientos marginan, entre otras cosas, la dimensión “profundidad”, que tanta importancia tiene para la comprensión de la dinámica oceánica y de los procesos biológicos que encierra. En el campo de las estadísticas pesqueras, muy posiblemente por sus directas implicaciones económicas, programas como los anteriormente citados o no existen o están todavía muy retrasados.

VARIACIONES DE BIOMASA RELACIONADAS CON FENÓMENOS DE AFLORAMIENTO A PEQUEÑA ESCALA

Otro buen ejemplo de las variaciones de biomasa de poblaciones explotadas en relación con determinadas condiciones oceanográficas lo encontramos en las aguas de Galicia, concretamente en la variación de la biomasa de la población del cefalópodo omastreídeo *Todaropsis eblanae* (Rasero, 1994; González, Rasero y Guerra, 1996). En este estudio se compararon dos tipos de datos: a) los de captura por unidad de esfuerzo (CPUE) obtenidos, usando la misma metodología, en campañas de prospección pesquera efectuadas entre 1973 y 1990 en la plataforma de Galicia, desde el río Miño hasta Ribadeo; y b) los valores promedio del índice de afloramiento en esta área durante los meses de primavera y verano, que son cuando tiene lugar los máximos reproductivos de ambas especies, estimados

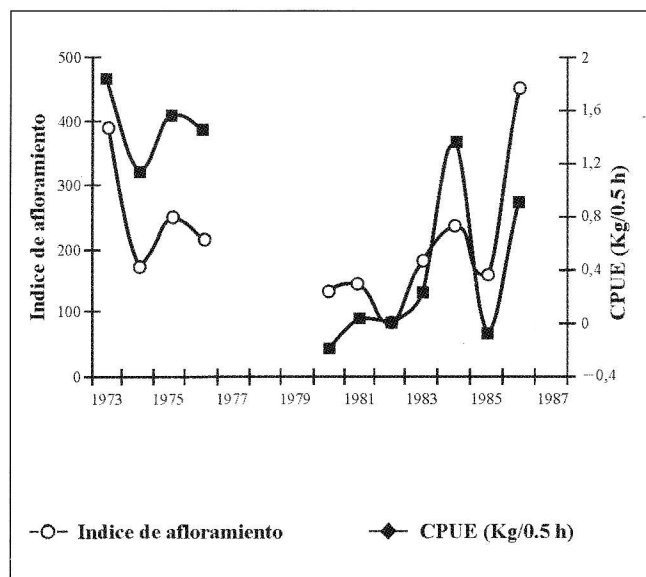


Figura 6. Relación entre las capturas por unidad de esfuerzo (CPUE) de *Illes coindetii* y el índice de afloramiento en las costas de Galicia durante el periodo 1973-1987 (Rasero, 1994 y González et al., 1996).

a partir de los valores diarios calculados por Lavín, Díaz del Río, Cabanas y Casas (1991) para una estación situada frente a las costas de Galicia a 150 km al oeste del cabo Finisterre.

La pota costera (*T. eblanae*) vive en la plataforma de Galicia y se pesca al arrastre en la pesquería multi-específica cuyas especies objetivo son la merluza, el jurel, la bacaladilla y la cigala. Tiene una esperanza de vida de aproximadamente un año, y una época de reproducción que se extiende a lo largo del año, con máximos reproductivos en los meses de primavera y verano. El reclutamiento a la pesquería se produce durante todo el año, pero es sensiblemente más abundante durante el otoño. Estos datos revelan que dicho reclutamiento otoñal procedería de los animales eclosionados durante la primavera y el verano de ese mismo año.

Se encontró una fuerte correlación entre el índice de afloramiento y las CPUE calculadas durante las campañas (Fig. 6). Para explicar esta correspondencia se puede apelar a dos consideraciones: a) aunque la larva de esta especie es todavía desconocida, debe tener una fase planctónica, como ocurre en el resto de los omastréfid, alimentándose de pequeños crustáceos planctónicos. Se conoce, además, que la alimentación durante las primeras fases del ciclo vital de

la mayoría de los cefalópodos con larvas planctónicas es un punto crítico, aconteciendo en ella tasas de mortalidad muy elevadas, y que, en general, los estadios planctónicos de los cefalópodos son la fase más vulnerable de su corto ciclo de vida. Como consecuencia, la disponibilidad de comida es crítica para la supervivencia de los recién eclosionados y, consiguientemente, para el éxito del reclutamiento; y b) el afloramiento costero que ocurre en Galicia anualmente entre abril-mayo y septiembre-octubre incrementa notablemente la producción primaria, lo que provoca un notable aumento de la producción de zooplancton —especialmente de copépodos— que constituye la base de la dieta de las larvas planctónicas de los cefalópodos.

Por lo tanto, la relación observada entre la abundancia y el índice de afloramiento podría ser debida al incremento de la supervivencia de las larvas y pre-reclutas de esta especie por el aumento de la disponibilidad de alimento, como consecuencia de la elevada productividad causada por el afloramiento. La comprensión de cómo los aumentos y descensos de producción de ésta y otras poblaciones de cefalópodos, peces y crustáceos de las costas de Galicia son controlados por los fenómenos de enriquecimiento, concentración y retención, gobernados a su vez por factores climáticos (Bakun, 1998), durante los periodos de afloramiento es algo en lo que se está investigando actualmente.

Efectos parecidos de la variabilidad ambiental sobre otros recursos marinos pueden hallarse en organismos tan diferentes como la sardina, el bacalao, las ostras o el krill antártico (Wyatt y Larrañeta, 1988; Hofmann y Powell, 1998). En la primera de las recopilaciones citadas se exponen, además, algunos ejemplos de interacción entre procesos cósmicos —como las fases lunares y el ritmo solar— y las poblaciones naturales marinas.

FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN A LA FISIOLOGÍA DE LOS ORGANISMOS

La mayoría de los estudios más clásicos sobre del impacto del medio ambiente en los estados iniciales de los organismos y su incorporación a los stocks

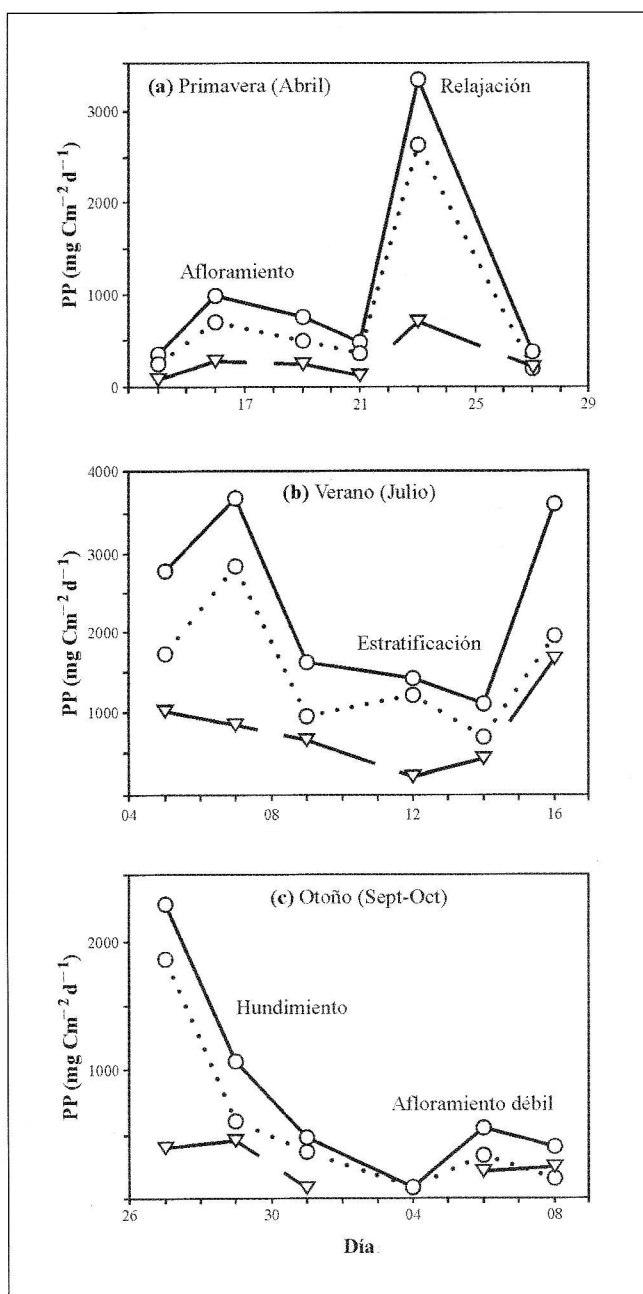


Figura 7. Producción primaria (PP) diaria integrada para toda la columna de agua en la ría de Vigo en primavera (a); verano (b); y otoño (c). La línea continua indica el fitoplancton total, la de puntos la fracción $>20\mu\text{m}$, y la cortada la fracción de fitoplancton $<20\mu\text{m}$. (Figueiras et al., 2002).

explotados (reclutamiento), es decir, de las fluctuaciones de largo periodo que experimentan las poblaciones naturales, se han centrado en hallar los mecanismos a través de los cuales explicar las variaciones de su tasa de sobrevivencia por estar o no en el momento y en el lugar adecuado. Esos mecanismos han sido del tipo: corrientes marinas, afloramientos,

frentes provocados por el choque de masas de agua de diferentes propiedades, estratificación de la termoclina o de la termohalina, o fenómenos similares muchos de los cuales tienen que ver con el clima y con el cambio climático. Sin embargo, se comienza también a dar importancia, además de a su abundancia, a características más finas de las partículas y organismos que interactúan con los factores ambientales, como son su tamaño, flotabilidad, velocidad de desarrollo, etc. En este sentido, el ejemplo que se expone a continuación ilustra sobre la influencia de las características del seston en la fisiología y crecimiento del mejillón.

Las Rías Bajas son cuatro valles tectónicos hundidos del noroeste de la península Ibérica que soportan una producción anual de mejillón (*Mytilus galloprovincialis*) de aproximadamente 250.000 toneladas en 3337 bateas de cultivo. Esta producción es la más alta de Europa y una de las más elevadas del mundo. Las causas de esta alta producción de mejillón han sido estudiadas por Figueiras, Labarta y Fernández Reiriz (2002). Según estos autores, la interacción entre el afloramiento costero y el modelo de circulación de las rías, que canaliza la variabilidad tridimensional del océano abierto en un sistema bidimensional, provoca una respuesta masiva en la productividad de las poblaciones fitoplanctónicas presentes en el interior de las rías, incluso durante eventos de afloramiento débiles a lo largo de la costa. El afloramiento costero acontece generalmente en esa área entre marzo y octubre. El promedio de producción primaria neta durante toda la estación de surgencias es de aproximadamente $1,4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, aunque durante eventos de relajación del afloramiento pueden darse valores esporádicos de hasta $4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, cuando la exportación de fitoplancton desde el interior de las rías hacia la plataforma continental adyacente se relaja (Fig. 7). El crecimiento del mejillón ocurre principalmente durante el periodo de afloramiento. Se ha estimado que el mejillón cultivado consume aproximadamente un 10% de la producción primaria. La respuesta del fitoplancton al afloramiento proporciona un alimento de alta calidad (f aproximadamente 0,5, siendo f la razón entre la materia orgánica particulada (MOP) y el total de materia particulada, TMP) que determina altas eficiencias de absorción (aproximadamente 0,6), mientras que las características de las rías mantienen la concentración de seston a niveles (0,5-1,3 mg de TMP por litro y $<5 \text{ mg}$ de clorofila a por m^3) por debajo del umbral de la producción

de pseudoheces. El comportamiento fisiológico de los mejillones indica que el elevado rendimiento del cultivo de esa especie en las rías gallegas es una consecuencia de las particulares características del conjunto de seston. Por lo tanto, los dos factores ambientales señalados, el afloramiento costero y la circulación de las rías, influyen en la fisiología del molusco y, consecuentemente, en sus tasas de crecimiento, que son mayores que las que se obtienen en otros ecosistemas con superiores concentraciones de seston o mayores concentraciones de clorofila y de alimento de calidad.

OTRO DESARROLLO TEÓRICO POSIBLE: FLUCTUACIONES CAÓTICAS

Las poblaciones naturales experimentan todo tipo de fluctuaciones, en las que deben esperarse regularidades por su dependencia de los ritmos cósmicos, y también como consecuencia de osciladores internos del tipo depredador-presa (Margalef, 1988). En las poblaciones explotadas de organismos marinos las interacciones entre la extracción y los cambios de su abundancia, su estructura demográfica o su potencial reproductivo, que afectan a la mortalidad total y al reclutamiento, pueden contemplarse en el contexto de relaciones depredador-presa. Y ello tanto si el hombre actúa explotándolas selectivamente —pesca con especies objetivo—, como si actúa indiscriminadamente, aunque en este caso el impacto sea más difícil de identificar.

Como las series de datos abióticos y bióticos que se emplean en los estudios de los organismos marinos corresponden al sistema más amplio de la biosfera, cabe esperar no sólo cierta coherencia en los cambios espaciales y temporales entre unas y otras series, sino también ciertas regularidades o formas de respuesta, que mantendrían algo en común a diferentes escalas temporales. De hecho, las poblaciones marinas están regidas por ingresos de energía externa de origen atmosférico-oceánico que perturban y obligan a recomenzar las sucesiones ecológicas. Esa energía externa acelera la producción primaria en estructuras como los afloramientos, los frentes y las corrientes de marea. Los distintos segmentos de la sucesión comienzan con pulsos de fuerte producción, que van pasando, poco a poco y aparentemente de forma aleatoria, a una situación dinámica menos evidente y de gran hetero-

geneidad espacial. Las fluctuaciones irregulares son frecuentes en etapas intermedias y cabe preguntarse si el concepto matemático del caos sería una explicación (Margalef, 1988).

En el estudio de los océanos existen numerosos problemas, relacionados por ejemplo con fenómenos de turbulencia, muy comunes en remolinos de diferente envergadura, cuyas características son típicas de un comportamiento no lineal. La ausencia de linealidad es una característica de todo sistema caótico, cuya propiedad más importante es que pequeños cambios en las condiciones iniciales alteran de forma substancial la trayectoria que sigue un elemento o una estructura y su estado final. Algo parecido ocurre en el estudio de la dinámica de las poblaciones de organismos vivos, donde se pueden generar series caóticas por medio de expresiones bastante sencillas (Fig. 8), algunas de indudable semejanza con el modelo que Lotka y Volterra emplearon para las relaciones “presa-depredador” (Margalef, 1974; Margalef, 1988). Este tipo de interacciones que involucran elementos o estructuras no se pueden describir mediante sistemas lineales, lo mismo que tampoco puede hacerse con la interacción entre el ambiente y los seres vivos.

Aunque todavía no existen métodos matemáticos generales sistemáticos para tratar las ecuaciones no lineales, el examen de dos series temporales que se

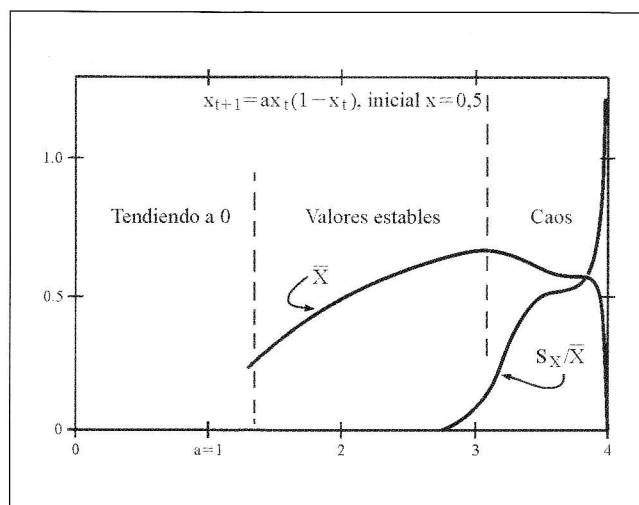


Figura 8. Una ecuación sencilla puede generar series caóticas únicamente para un limitado valor del parámetro “a”. Para valores bajos de “a” la serie es convergente. El valor medio de “x” y la variabilidad (desviación típica/media) cambian rápidamente cuando “a” se aproxima a 4. (Margalef, 1988).

desean relacionar se puede comenzar con un gráfico en el que se marcan en el eje de abscisas los valores de una misma variable en el tiempo " $t+1$ " y en el de ordenadas en " t ", o enfrentando las dos variables. Ello ayuda a comprobar cómo se distribuye el conjunto de los puntos, pudiendo indicar, además, la existencia de captadores y de sus propiedades. Cuando interfieren fenómenos que se relacionan con el eje vertical con otros más propios del eje horizontal, cabe esperar la existencia de fluctuaciones irregulares en apariencia erráticas, y quizá caóticas, en la organización del sistema. Este tipo de interacción es esperable en etapas intermedias de la sucesión o en la proximidad de estructuras donde se realiza trabajo y donde se originan inestabilidades. En los ecosistemas marinos eso acontece en frentes, afloramientos, corrientes de marea, etc.

Ya sea analizando tendencias de periodo largo y de mesoescala, como las que se observan en las fluctuaciones de abundancia de numerosas poblaciones marinas naturales, o las que se aprecian al analizar sucesiones más cortas propias del fitoplancton, parece emerger con constancia una regla general, que podría enunciarse de la siguiente manera (Margalef, 1988): en cualquier escala que se mire, la dinámica de la biosfera está constituida por un conjunto de procesos de sucesión, que trabajan según una pauta muy rica y extremadamente pasiva, testimonio de sucesiones ya agotadas. El conjunto global se mantiene productivo debido a pulsos de ingresos que suscitan una respuesta asimétrica de la vida. Esta respuesta consiste en una rápida simplificación de las estructuras, seguida por un lento camino hacia la complejidad. Muchas propiedades de los ecosistemas se explican por este juego entre las sacudidas producidas por ingresos discontinuos de energía externa y la capacidad de la vida para dominarlas parcialmente. Las poblaciones que constituyen recursos marinos parecen estar sujetas a este tipo de cambios en una escala de grandes dimensiones.

El tipo de transiciones entre comportamientos arbitrarios a regulares y viceversa, así como la existencia de pulsos que dan lugar a estructuras localizadas, relativamente estables y coherentes, parece poder explicarse mediante sistemas de ecuaciones no lineales. No obstante, considerando que es mucho todavía lo que desconocemos sobre el funcionamiento de los procesos hidrodinámicos de los océanos y de los ciclos

biogeoquímicos, pudiera ser que la semejanza entre las fluctuaciones irregulares de las poblaciones marinas y las series caóticas fuese artificial y engañosa.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi gratitud a Ángel F. González, Jaime Otero, Francisco J. Rocha, Félix Fernández Pérez y Carmen González Castro por las valiosas sugerencias que han mejorado este manuscrito. A María Teresa Fernández le agradezco su colaboración en la creación y mantenimiento de los ficheros bibliográficos informatizados de ECOBIOMAR.

BIBLIOGRAFÍA

1. Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Hoegh-Guldberg, O & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416: 389-395.
2. Gell-Mann, M. (1995) *El quark y el jaguar*. Tusquets. Barcelona.
3. Myers, R.A. & Worm, B. (2003). Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature*, 424: 280-283.
4. Pauly, D., Chistensen, V., Dalsgaard, J., Froese R. & Torres Jr. F.C. (1998a). Fishing down marine food webs. *Science*, 279, 860-863.
5. Caddy, J., Csirke, J., García, S.M. & Grainger, R.J.R. (1998). How pervasive is "Fishing down marine food webs". *Science*, 282: 1383.
6. Pauly, D., Froese, R. & Chistensen, V. (1998b). "Fishing down marine food webs": response to Caddy et al. *Science*, 282, 1839.
7. United Nations (1995) *Agreement for the implementation of the provisions of the United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 December 1982, relating to the conservation and management of straddling fish stocks and highly migratory fish stocks*. UN General Assembly, Doc. A/CONF. 164/37, September 8, pp. 36.
8. FAO (1995). *Code of Conduct for Responsible Fisheries*, pp 41.
9. Margalef, R. (1974). *Ecología*. Editorial Omega. Barcelona.
10. González, A.F., Trathan, P.N., Yau, C. & Rodhouse, P.G. (1997). Interactions between oceanography, ecology and fishery biology of the ommastrephid squid

- Martialia hyadesi* in the South Atlantic. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 152, 205-2145.
11. Chavez, F.P., Ryan, J., Lluch-Cota, E. & Niquen C, M. (2003). From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific ocean. *Science*, 299: 217-221.
 12. Fromentin, J.-M & Plaque, B. (1996). *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic. 2. Influence of the North Atlantic Oscillation on *C. finmarchius* and *C. helgolandicus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 134: 111-118.
 13. Guerra, A. & Sánchez Lizaso, J.L. (1998). *Fundamentos de explotación de recursos vivos marinos*. Ed. Acribia. Zaragoza.
 14. Rasero, M. (1994). Relationships between cephalopod abundance and upwelling: the case of *Todaropsis eblanae* (Cephalopoda, Ommastrephidae) in Galician waters. ICES C.M. K: 20.
 15. González, A.F., Rasero, M. & Guerra, A (1996). La explotación de los omastrefidos *Illex coindetii* y *Todaropsis eblanae* (Mollusca, Cephalopoda) en aguas de Galicia. *Nova Acta Científica Compostelana*, 6, 191-203.
 16. Lavin, A., Díaz del Río, G., Cabanas, J.M & Casas, G. (1991). Afloramiento de la península Ibérica. Índices de afloramiento para el punto 43° N 11° W. Periodo 1966-1989. *Inf. Tec. Inst. Esp. Oceanogr.*, 91, pp 40.
 17. Bakun, A. (1998). En: *Reinventing Fisheries Management*. Eds: Pitcher, T.H., Hart, P.J.B. & Pauly, D. Kluber Academic, Dordrecht, pp. 331-358.
 18. Wyatt, T & Larrañeta, M.G. (1988) (Eds.). *Long term changes in marine fish populations*. Simposio internacional celebrado en Vigo, 18-21. Noviembre, 1986. Instituto de Investigaciones Marinas (CSIC, Vigo), pp 555.
 19. Hofmann, E.E. & Powell, T. M. (1998). Environmental variability effects on marine fisheries: four case histories. *Ecol. Appl.*, 8(1), Supplement, S23-S32.
 20. Figueiras F.G., Labarta, U. & Fernández Reiriz, M.J. (2002). Coastal upwelling, primary production and mussel growth in the Rías Baixas of Galicia. *Hydrobiologia*, 484, 121-131.
 21. Margalef, R (1988). Reset successions and suspected chaos models of marine populations. En: *Long term changes in marine fish populations*. Eds.: Wyatt, T & Larrañeta, M.G. Simposio internacional celebrado en Vigo, 18-21. Noviembre, 1986. Instituto de Investigaciones Marinas (CSIC, Vigo), pp. 321-343.